

Dualité onde-corpuscule

Sommaire

-I-	Aspects ondulatoire et particulaire de la lumière.	-----2
1.	Comportement ondulatoire de la lumière.	----- 2
2.	Comportement particulaire de la lumière.	----- 2
3.	Dualité onde-particule.	----- 2
-II-	Particules matérielles et onde de matière.	-----3
1.	L'hypothèse de Louis De Broglie.	----- 3
2.	La relation de de Broglie	----- 3
-III-	Aspect probabiliste des phénomènes quantiques.	-----3
1.	Phénomènes quantiques.	----- 3
2.	Comportement aléatoire.	----- 3
3.	Approche probabiliste.	----- 4

Notions et contenus :

- Photon et onde lumineuse.
- Particule matérielle et onde de matière ; relation de De Broglie.
- Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière.

Compétences attendues :

- Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
- Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule.
- Connaître et utiliser la relation $p = h / \lambda$.
- Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
- Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.

Dualité onde-particule

La détermination de la nature de la lumière fut l'objet de nombreuses controverses durant l'histoire.

-I-Aspects ondulatoire et particulaire de la lumière.

1. Comportement ondulatoire de la lumière.

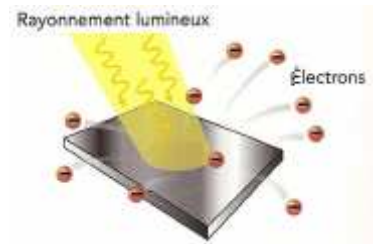
Dans son *Traité de la lumière*, Christian Huygens (1629-1695) interprète la lumière comme la propagation d'une onde. Deux siècles plus tard, James Clerk Maxwell (1831-1879) introduit la théorie de la propagation des ondes électromagnétiques. La lumière devient alors un cas particulier d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.

Les phénomènes de diffraction ou d'interférences sont des manifestations du comportement ondulatoire de la lumière.

Pourtant, en 1905, Albert EINSTEIN (1879-1955) postule que l'énergie de la lumière est transportée par des grains d'énergie. Il explique ainsi théoriquement l'effet photoélectrique (Doc.1) mis en évidence en 1887 par l'expérience de l'Allemand Heinrich HERTZ (1857-1894).

Actuellement, la lumière et plus généralement les ondes électromagnétiques sont décrites comme des flux de photons.

Un photon est une particule non chargée, de masse nulle et se déplaçant à la vitesse de la lumière.



Doc.1: Effet photoélectrique

L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect particulaire et ondulatoire.

L'énergie d'un photon est: $E = h \cdot \nu$

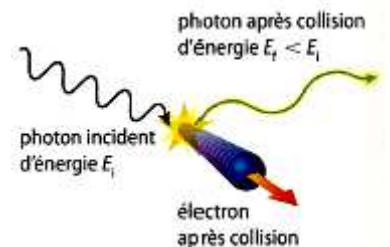
avec $\left\{ \begin{array}{l} E \text{ en joule (J),} \\ h: \text{ constante de Planck en joule.seconde (J. s)} \\ \nu: \text{ fréquence de l'onde en hertz (Hz).} \end{array} \right.$

2. Comportement particulaire de la lumière.

Pour Isaac Newton (1643-1727), la lumière est composée de petites particules massiques et rapides. C'est une conception particulaire de la lumière.

Au début du XX^e siècle, Einstein (1879-1955) propose le modèle du photon, qu'on peut considérer comme une particule transportant un quantum d'énergie.

L'effet Compton (Doc.2) est une manifestation de ce comportement particulaire. Cette expérience est interprétée comme une collision, dite élastique, entre un photon et un électron. Après la collision, le photon voit son énergie diminuer au profit de l'électron.



Doc.2: Effet Compton

Certains phénomènes, comme l'effet Compton, sont des manifestations du comportement particulaire de la lumière.

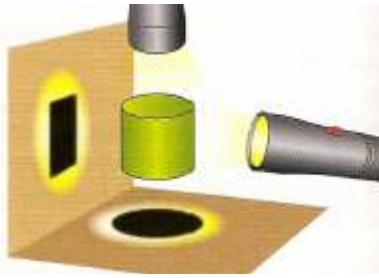
À toute particule matérielle, c'est-à-dire ayant une masse m , animée d'une vitesse de valeur v très inférieure à la célérité c de la lumière, on associe une grandeur appelée quantité de mouvement, dont la valeur, notée p , est définie par : $p = m \cdot v$

avec $\left\{ \begin{array}{l} p \text{ en kilogramme mètre par seconde (kg.m.s}^{-1}\text{),} \\ m \text{ en kilogramme (kg)} \\ v \text{ en mètre par seconde (m.s}^{-1}\text{).} \end{array} \right.$

3. Dualité onde-particule.

Au cours de l'histoire, les physiciens ont donc interprété la nature de la lumière soit par son comportement ondulatoire, soit par son comportement particulaire. Pour autant, ces deux concepts isolés sont insuffisants pour décrire dans son ensemble la nature de la lumière.

Les concepts classiques d'onde et de particule pris isolément sont insuffisants pour interpréter complètement la nature de la lumière.



Doc.3: Métaphore du cylindre

Exemple:

Suivant les conditions d'observation, le cylindre se comporte tantôt comme un cercle, tantôt comme un rectangle (**Doc. 3**). La nature du cylindre est pourtant différente de ces deux éléments pris isolément.

La lumière se comporte tantôt comme une onde, tantôt comme une particule: ce sont les conditions de l'expérience qui orientent son comportement. Pour désigner ce double comportement, on utilise l'expression de dualité onde-particule.

-II- Particules matérielles et onde de matière.

1. L'hypothèse de Louis De Broglie.

En 1923, le physicien français Louis de Broglie (**Doc.4**) propose de généraliser la dualité onde-particule, admise pour la lumière, à tous les objets microscopiques: il émet ainsi l'hypothèse que ce double comportement, ondulatoire et corpusculaire de la lumière, est observable chez tous les objets microscopiques de la matière (électrons, protons, neutrons ...).

Cette hypothèse est confirmée en 1927 par l'observation du phénomène de diffraction pour des électrons, en présence d'un obstacle ou d'une ouverture. Quelques années plus tard, le phénomène d'interférences d'électrons est observé (**Doc.6**), validant ainsi complètement l'hypothèse de De Broglie.



Doc.4: Louis De Broglie
Prix Nobel en 1929

Les objets microscopiques de la matière (électrons, protons, ...) présentent, comme la lumière, un double aspect ondulatoire et particulaire.

2. La relation de de Broglie

Pour tenter d'unifier ce double comportement de la matière, de Broglie introduit la notion d'onde de matière. La relation qui porte son nom permet de relier les deux concepts classiques d'onde et de particule.

À chaque particule en mouvement est associée une onde de matière de longueur d'onde λ , liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation de De Broglie:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} h: \text{constante de Planck } (h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}); \\ p: \text{quantité de mouvement en kg.m.s}^{-1}; \\ \lambda: \text{longueur d'onde de matière en m.} \end{cases}$$

-III- Aspect probabiliste des phénomènes quantiques.

1. Phénomènes quantiques.

Les phénomènes quantiques sont les phénomènes où interviennent des objets microscopiques de la matière (électrons, protons, ...) et qui ne s'expliquent pas par les lois classiques de la physique.

Dans le cas de la figure d'interférences obtenue avec un faisceau d'électrons et deux fentes étroites et rapprochées, appelées fentes (ou bifente) de Young (**Doc.5**), la position de l'impact sur l'écran ne permet pas de déterminer la trajectoire des électrons. Les électrons semblent passer par les deux fentes en même temps, ce qui n'a aucun sens.

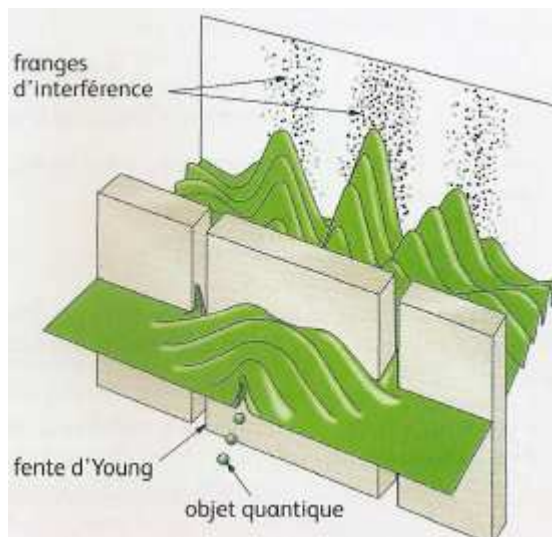
Dans l'étude des phénomènes quantiques, la notion de trajectoire n'est plus pertinente. On ne peut pas déterminer la trajectoire d'une particule qui manifeste un comportement ondulatoire.

2. Comportement aléatoire.

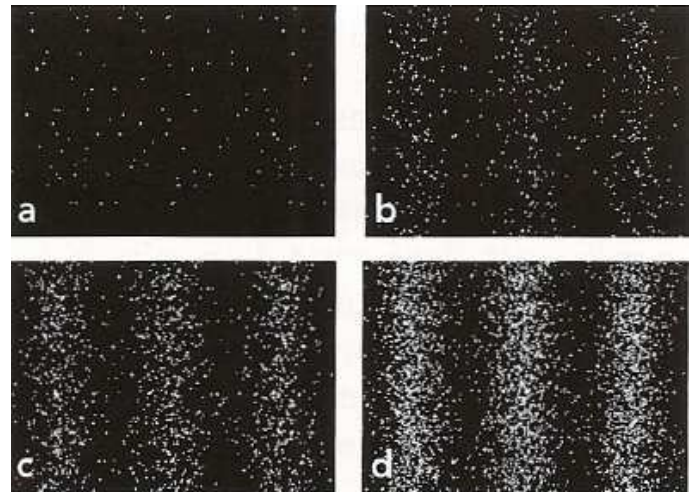
Le **document 6** illustre les interférences particule par particule obtenues avec un faisceau d'électrons traversant des fentes de Young. La distribution spatiale des impacts des électrons sur l'écran semble chaotique pour un faible nombre d'électrons (8 à 2 000). Pour un nombre important d'entre eux (6 000

électrons), la distribution est ordonnée: on observe d'une part des zones où le nombre d'impacts est important, d'autre part des zones avec très peu d'impacts.

Cette distribution ordonnée des impacts peut s'interpréter par un comportement aléatoire de la particule de matière.



Doc.5: Caractère ondulatoire d'un objet quantique représenté par une onde de probabilité de présence au passage des deux fentes.



Doc.6: Figure d'interférences obtenues avec un faisceau d'électrons et des fentes de Young: a) 8 électrons b) 270 électrons c) 2000 électrons d) 6000 électrons

Dans une expérience d'interférence, on ne peut pas prévoir la position de l'impact d'un photon sur l'écran. Mais lorsque leur nombre est important, ils respectent une loi de probabilité et forment le motif caractéristique des franges d'interférence. Les franges s'interprètent comme une alternance de zones où un photon a une probabilité de présence minimale ou maximale.

Remarque: La même expérience réalisée, non pas avec des électrons, mais avec des photons conduit aux mêmes observations. L'électron, comme le photon sont des objets quantiques.

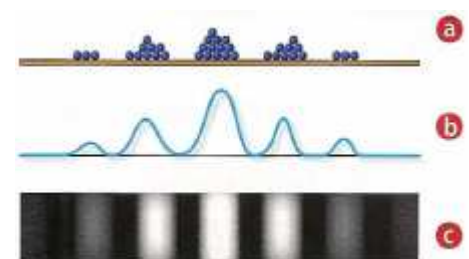
- Un objet quantique ou quanton présentent simultanément l'aspect particulaire et l'aspect ondulatoire.
- Les prévisions sur le comportement d'un objet quantique ne peuvent être que du type probabiliste (Doc.5).

3. Approche probabiliste.

Une étude de mécanique classique de la distribution des impacts n'est pas envisageable pour les phénomènes quantiques. Le comportement aléatoire des particules quantiques permet tout de même d'extraire des informations de nature probabiliste.

Exemple:

Sur le document 7, les zones les plus lumineuses (c) correspondent aux zones où la probabilité d'impact (b) d'un photon sur l'écran est la plus importante. À l'opposé, la probabilité d'impact d'un photon est très faible pour les zones sombres.



Doc.7: Interférences obtenues avec de la lumière blanche.

- a) nombre d'impacts sur l'écran;
b) probabilité de l'impact en fonction de la position;
c) figure d'interférences.

Les particules du monde microscopique sont soumises à des lois probabilistes. Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir un comportement.

Remarques:

- Un système qui a un comportement chaotique est imprévisible.
- Un système qui a un comportement aléatoire obéit à une distribution statistique.